

単結晶ダイヤモンドを用いた 超精密切削工具

Single-Crystal Diamond Cutting Tool for Ultra-Precision Processing

小島 一志
Kazushi Obata

ダイヤモンド切削工具は、その優れた切れ味・耐摩耗性を生かし非鉄金属加工の様々な用途で使用されている。その中でも単結晶ダイヤモンドを用いる超精密ダイヤモンド切削工具は光ディスクのピックアップレンズやスマートフォンカメラレンズなどの樹脂レンズ金型、液晶パネルの光学プリズム金型、レーザ反射鏡など光学部品の超精密加工に用いられている。一方、超精密加工技術としては1nmで制御が可能な5軸の超精密加工機が現れ、これらに対応するため超精密ダイヤモンド切削工具も高精度化、微細化が求められている。本稿では合成ダイヤモンド単結晶 スミクリスタル®を用いた超精密ダイヤモンド切削工具 UPC®の特徴を通じて開発の経緯などを紹介すると共に、UPC®を用い超精密加工されている住友電工ハードメタル(株)の光学部品についても紹介する。

Diamond cutting tools are used for various applications in nonferrous metal processing as they have superior sharpness and excellent wear resistance. Ultra-precision diamond cutting tools made of single-crystal diamond are used for processing resin molds for optical disk pickup lenses and smartphone camera lenses, as well as optical prism molds for liquid crystal panels. These tools are also used for the ultra-precision processing of laser reflecting mirrors in optical components. Meanwhile, a five-axe cutting machine that can operate in the 1-nm level was developed. To be employed for this machine, high-precision and small diamond cutting tools are required. This paper describes the characteristics of the ultra-precision diamond cutting (UPC®) tool made of synthetic single crystal diamond named "SUMICRYSTAL®." It also introduces the applications of the UPC® in the ultra-precision processing of the optical components that Sumitomo Electric Hardmetal Corporation produces.

キーワード：単結晶ダイヤモンド、超精密ダイヤモンド切削工具、CO₂レーザ、レンズ、ミラー

1. 緒 言

単結晶ダイヤモンドを用いた超精密ダイヤモンド切削工具(写真1)は光学部品を中心とする高精度化、微細化への市場ニーズの高まりと超精密加工技術の進歩に対応して切削によるナノメートル精度の高精度微細加工を実現してきた。当社における超精密ダイヤモンドバイトの開発はHDD(ハードディスクドライブ)のアルミ基盤の鏡面加工から始まり、現在で

はDVD(デジタルビデオディスク)のピックアップレンズ、スマートフォンカメラレンズ、LED照明用レンズなどの非球面レンズ金型や回折格子金型、液晶パネルの光学プリズム金型、レーザ反射鏡の加工など様々な光学部品のキーとなる部分の高精度加工用途へと広がっている。これらの部品の形状、精度に対応するため工作機械は1nm制御が可能な5軸の超精密加工機も現れ、超精密ダイヤモンド切削工具も高精度化が要求された。その要求に応えるため、従来の天然ダイヤモンドの宝石研磨と同様の職人の経験と勘による手工芸品の世界から、理論と製造技術に裏打ちされた工業製品の世界へと高めるべく超精密ダイヤモンド切削工具の開発、商品化に取り組んできた。超精密ダイヤモンド切削工具の性能と用途の紹介を通じてその取り組みを紹介する。



写真1 超精密ダイヤモンド切削工具

2. 合成ダイヤモンド単結晶 スミクリスタル®

超精密ダイヤモンド切削工具の工業製品化への一番の障害は工具素材であるダイヤモンドが天然素材であることであった。無色透明の形の整ったものは宝石として使用されるため、切削工具に用いられるダイヤモンド原石は写真2のように形、品質にバラツキがあった。ダイヤモンド原石の選別、研磨にも職人の経験と勘によるもので、素材だけでなく作業

者の熟練度も工具性能がばらつく要因であった。それを解決するため住友電気工業(株) (以下：住友電工) で開発された合成ダイヤモンド単結晶 スミクリスタル® (写真3) を採用した。ただ、スミクリスタル®は均一で耐摩耗性が高く、天然ダイヤモンドのように部分的に柔らかかなところがないため刃付け研磨が難しいという難点があった。そこで当社では研磨は難しくても基準面に対して常に一定の特性を示すことを利用し、熟練技能に頼らずに高精度な切れ刃を実現する研磨装置を独自で開発した。この研磨装置と品質の安定したスミクリスタル®の採用で従来以上に安定した研磨が行えるようになり、超精密ダイヤモンド切削工具の開発が大きく前進した。

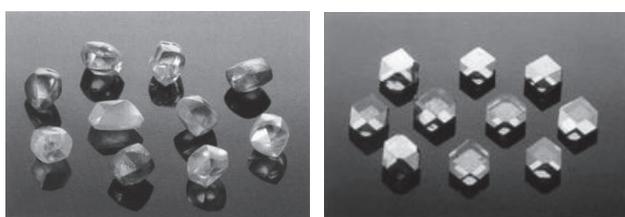


写真2 天然ダイヤモンド

写真3 スミクリスタル®

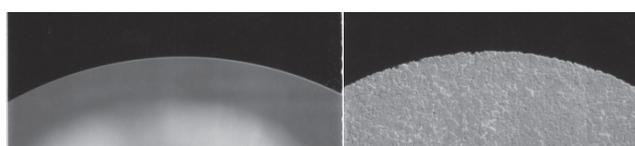
3. 超精密ダイヤモンド切削工具 UPC®

1985年に株式会社アライドマテリアルの前身の一つである旧大阪ダイヤモンド工業(株) (以下：当社) より超精密ダイヤモンド切削工具はUPC® (Ultra-precision cutting tool以下：UPC®) と命名され販売が開始された。その当時、コンピュータの記憶媒体であるHDDのアルミ基盤の加工は単結晶ダイヤモンドバイトで鏡面加工されていた。UPC®もHDDアルミ基盤の加工用工具として販売が開始された。当社は後発ではあったが遜色ない鋭利な切れ刃が完成していた。しかし、使用すると短寿命であったり、初期のセッティングが難しいなどの問題があり、すぐには採用には至らなかった。一方で他社製の既存の工具も加工品質、工具寿命にバラツキが依然ありお客様も決して満足はしておらず、当社は原因の究明と工具改善に取り組んだ。その結果、切れ刃精度の向上や結晶方位^{*1}の最適化などが進み工具寿命のバラツキが激減し、長寿命化にも成功した。この時の切れ刃品質や結晶方位のノウハウがその後のUPC®開発に活かされることになる。

3-1 UPC®の切れ刃

超精密ダイヤモンド切削工具UPC®は天然ダイヤモンドの品質のばらつきを抑えるため前述のように合成ダイヤモンド単結晶(スミクリスタル®)を工具材として使用している。単結晶ダイヤモンドの特性を活かした非常に鋭利で耐久性のある刃で超精密切削加工機の動きを正確に被加工物に転写し、高精度な非球面加工や鏡面加工を行う切削工具である。この

ため、UPC®は加工機の動きを誤差なく被加工物に転写する高い形状精度の切れ刃と工作物表面を均一で平滑な表面に仕上げる鋭利で揺らぎ(微小な凹凸など)のない切れ刃が要求される。写真4は単結晶ダイヤモンドを工具材としたUPC®と、多結晶ダイヤモンド(PCD)を工具材としたPCD切削工具の切れ刃部を工具すくい面から見た比較である。UPC®は単結晶ダイヤモンドを研磨し均一で揺らぎのない切れ刃であるが、多結晶体であるPCD切削工具の切れ刃はUPC®の切れ刃と比較しダイヤモンド微粒子の脱落や界面の微小な凹凸があることがわかる。このように切れ刃にサブマイクロメートルオーダの凹凸や脱落部が存在すると、その凹凸が工作物表面に転写され良好な鏡面加工が行えない。

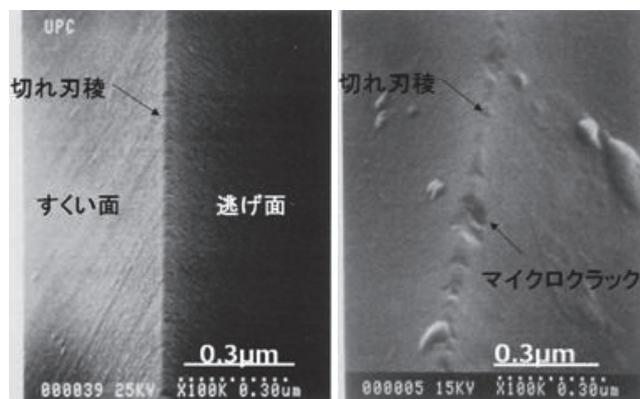


(a) UPC®

(b) PCD 切削工具

写真4 切れ刃の比較

写真5は当社で開発した研磨装置によるUPC®切れ刃と従来研磨装置による切れ刃の比較である。UPC®の切れ刃丸み(鋭利さ)は写真の(a)のように50nm以下と非常に鋭利で凹凸も存在せず、1μm以下の小さな切り込みでも安定した切削が行え、高い精度の加工面粗さ、形状精度が得られる。一方、従来の研磨装置による切れ刃には微小な凹凸が残り、この凹凸が工作物の表面に転写され表面粗さなどが悪化する。



(a) UPC®

(b) 従来品

写真5 切れ刃の比較

3-2 非球面レンズ金型加工用UPC®-R

UPC®が急成長したのはCD（コンパクトディスク）の光ピックアップレンズからスマートフォンカメラレンズへと続く非球面プラスチックレンズ金型加工用の工具需要が拡大したことである。1980年代初めにCDが世の中に登場し、その光ピックアップレンズは量産、コストダウンのためガラスレンズからプラスチックレンズに変わり主流となった。

写真6は非球面レンズ金型加工用のUPC®-Rと非球面金型、プラスチックレンズの例である。光学部品の小型高精度化に伴ってレンズ金型を加工する超精密旋盤の開発も進み、精度では1ナノメートル制御で工具の刃先位置をコントロールできるようになった。これに対応するため切れ刃の輪郭精度に高精度な工具が必要となった。



写真6 UPC®-Rとレンズおよび金型

非球面プラスチックレンズは図1に示すように超精密旋盤の2軸（X-Z）数値制御によりUPC®が非球面レンズ金型（無電解ニッケルめっき）を做い加工し、その金型で射出成型により大量生産される。このとき工具円弧切れ刃の輪郭度（真円に対する誤差）が悪いとその誤差が工作物に転写され非球面レンズ金型の精度を悪化させる。単結晶ダイヤモンドは結晶の異方性が存在し真円に研磨することが非常に困難であった。研磨装置を独自で開発することで0.1μmまでは達成できたが、DVDの登場や光ピックアップの小型化でレンズに求められる性能も厳しくなり、0.05μm以下の輪郭度が要求された。当時の工具の輪郭度測定機は0.1μmの輪郭度を計測するのが限界であり、独自で輪郭度測定機を開発することで世界最高精度である輪郭度0.05μm以下のUPC®-Rの開発に成功した。図2はその輪郭度測定機で測定したデータである。ナノメータオーダの計測機の自作は困難の連続であったが、常に原理原則に立ち返り対策をとることで解決できた。これもUPC®開発の大きな経験となった。また、研磨装置と

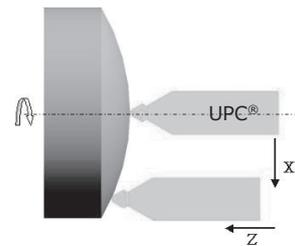


図1 2軸数値制御による金型加工イメージ

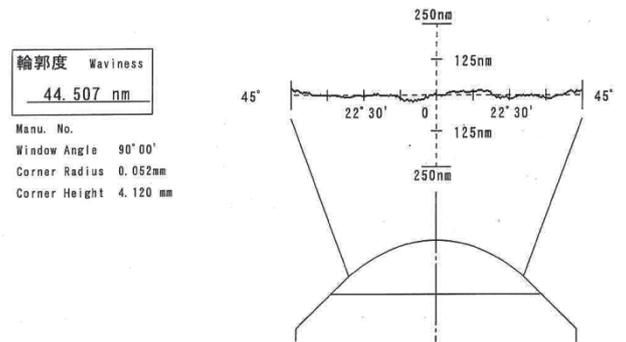


図2 開発した輪郭度測定機による測定データ

輪郭度測定機により、単結晶ダイヤモンド工具で一番難しく熟練が必要とされる円弧の研磨も熟練を必要とせず行えるようになった。

3-3 ホログラムレンズ加工用UPC®

DVDとCDはディスク内の信号の位置が異なるため、信号の読み取りのためのレーザー光の焦点を結び位置が異なる。この異なる2焦点を一つのレンズで結び機能を持たせものが、2焦点ホログラムレンズ（図3）である。これは、非球面レンズ部で一つの焦点を結び、その非球面レンズの中に刻まれた回折格子の回折光によりもう一つの焦点を結ぶものである。このレンズ金型を加工する工具には非球面を加工する高精度な輪郭度を持った円弧切れ刃と同時に、微細な回折格子を加工する鋭利に尖った切れ刃が要求される。その要求に応

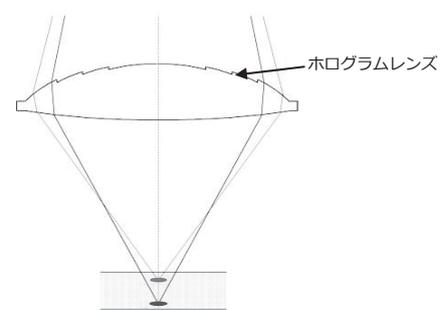


図3 ホログラムレンズの例

える工具として、**写真7**に示すような世界最小級の刃先コーナ半径R0.2 μ mの円弧切れ刃を持つUPC[®]を開発した。従来のUPC[®]-Rと同様に円弧切れ刃の輪郭度も非常に高精度であるため、超精密加工機の動きを正確に工作物に転写し、高精度な非球面形状が得られている。この工具の開発にも独自開発の研磨技術が活かされている。

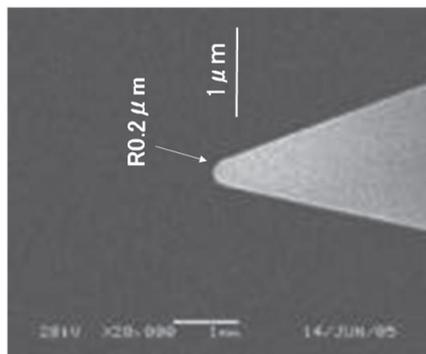


写真7 刃先コーナ半径 R0.2 μ mのUPC[®]

3-4 微細パターン金型加工用UPC[®]-T

液晶パネル用の導光板や光学プリズムシートなどの光学部品には光を反射、拡散させる微細形状がついている。これらの部品を成型する金型加工には切れ刃が三角刃形状であるUPC[®]-Tが用いられる。**図4**は加工イメージとUPC[®]-Tの切れ刃写真である。**写真8**は微細形状の加工例である。工具形

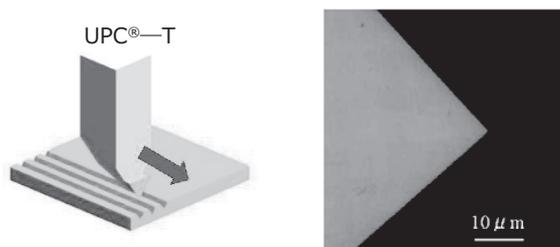


図4 加工イメージとUPC[®]の切れ刃

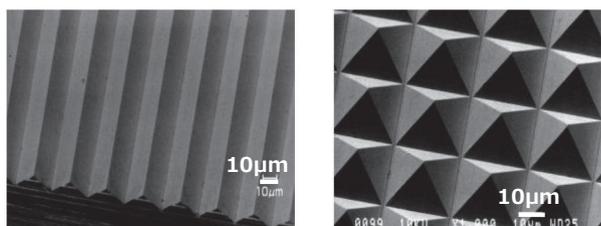


写真8 微細形状の加工例

状は単純であるが、UPC[®]の特徴である切れ刃の鋭利さ、均一性が工具寿命や光学特性において優位性を示す。

4. 住友電工の光学部品とUPC[®]

1990年代初めに販売を開始した住友電工のCO₂レーザー用光学部品の開発・商品化のプロジェクトにも当社は参画した。住友電工では当時の最高精度の超精密加工機を用いた超精密加工技術の構築に取り組み、当社はそれに対応するUPC[®]の改良に取り組み、世界最高レベルの精度を持つCO₂レーザー用光学部品の開発・商品化に成功した。成功の一番のポイントは、問題が発生しても、お互いに工具や加工法の問題とせず原理原則に基づく原因の究明に集中し、加工機、加工条件の改善、工具の改善に取り組んだことである。当社は単に工具を製作するだけのメーカーでなく実際の加工を知ることで、よりお客様に近い目線での商品開発ができるようになった。住友電工では工具性能を最大限に活かすことで、商品の競争力を高めた。

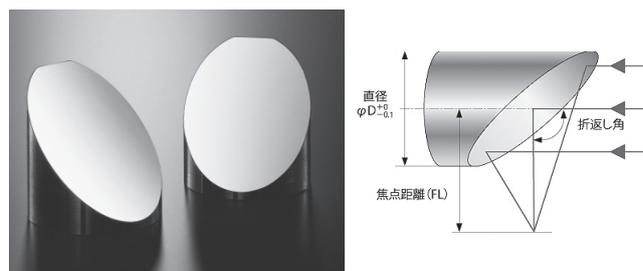


写真9 放物面鏡と集光イメージ

4-1 放物面鏡

写真9の放物面鏡は5kW以上の高出力CO₂レーザー光の集光ミラーとして用いられている。集光イメージの図のように鏡面に加工された面にレーザー光が反射し、所定の焦点距離の位置に集光する。

放物面鏡の材質は熱伝導性に優れ、超精密ダイヤモンド切削が可能な銅が用いられ、軽量化が必要な場合はアルミニウムが用いられることもある。どちらにも、反射面には反射率が良好で熱伝導性、耐久性に優れた金がコーティングされている。加工に伴う微粒子の付着が激しい部位には高熔点、高硬度の材料特性を持つモリブデンがコーティング材として使用される。このミラーの鏡面加工にもUPC[®]-Rが使用されている。大口径の断続切削で加工ノウハウが必要な加工である。

4-2 ZnSe非球面レンズ

ZnSe (ジंकセレン) のCO₂レーザー用非球面レンズ (**写真10**) もUPC[®]-Rによる超精密ダイヤモンド切削加工により加

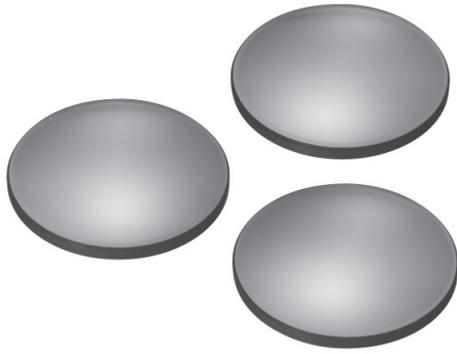


写真10 ZnSe非球面レンズ

工されている。非球面化で球面収差をできる限り抑え、小スポット化を達成している。短焦点で入射ビーム径の大きな光学系で威力を発揮する。鏡面切削が難しい材料であるため加工条件と工具仕様の最適化が必要であった。

5. UPC[®] ナノマイクロフォーミングツール[®]

2000年代に入ると超精密加工機は旋削タイプの2軸同時制御の加工機からエンドミル加工（フライス加工）にも対応した1nm制御の3-5軸同時制御の多軸加工機が開発され、さまざまな微細3次元形状がナノメータの精度で加工できるようになった。これらの加工に対応するため開発されたUPC[®]はマイクロメータサイズの形状をナノメータの精度で加工する工具、UPC[®]ナノマイクロフォーミングツール[®]として商品化された。

5-1 UPC[®]ナノボールエンドミル

液晶プロジェクター用のレンズ、ミラーなどに用いられるマイクロレンズアレイの金型に代表されるような三次元の凹凸加工および自由曲面加工を実現する工具として、ナノボールエンドミルがある。刃先の円弧は写真11のように最小R30 μ mまで開発されており、円弧の切れ刃の輪郭度は先

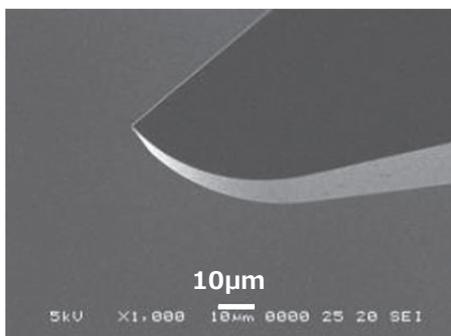


写真11 R30 μ mのナノボールエンドミルの刃先

に述べた超精密ダイヤモンド切削工具の円弧切れ刃と同様に50nmまで製作可能である。

使用法としてはナノメータオーダの位置決め精度を有する多軸超精密加工機による三次元エンドミル加工である。写真12はマイクロレンズアレイの加工例である。回転中心軸とコーナ円弧部の中心が高精度に合わされているため、真球形状が正しく転写されている。本例は単純な円弧形状の転写だけであるが、この真球形状に加工できる超微細ボールエンドミルを使用し多軸の超精密加工機を用いることで、3次元の自由な微細加工が可能である。

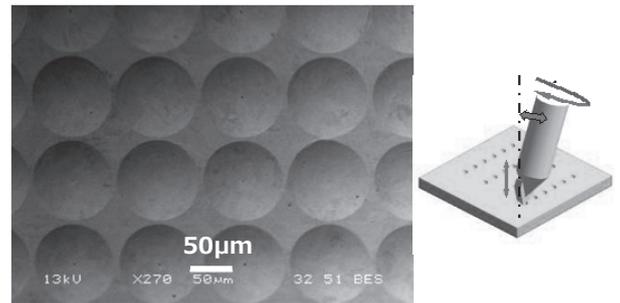


写真12 加工例と加工イメージ

5-2 ナノグループ（超微細溝入れバイト）

複雑な光学系を集約化したものにHOE（ホログラフィック光学素子）がある。これは、マイクロメータオーダのピッチで多数の微細な溝を刻んだもので、光の回折現象を利用して光を任意に分光、集光することができる光学素子である。その代表的な形状と金型切削のイメージを図5に示す。これらの光学素子の金型加工には、従来、半導体製造技術であるフォトリソグラフィとエッチングの技術により加工されてきたが、矩形溝の底のエッジが丸くなり、深い溝は数回に分けて段階的な溝を加工することから段差ができるなどして光の利用効率を低下させてしまう原因でもあった。そこで、これらの問題を解決するためのマイクロメータオーダの超微細な溝入れ加工が可能で、ナノグループがある。写真13は刃幅0.9 μ m（900nm）のナノグループで世界最小級の微細溝入

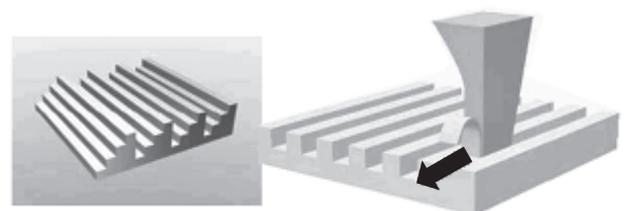


図5 金型と加工のイメージ

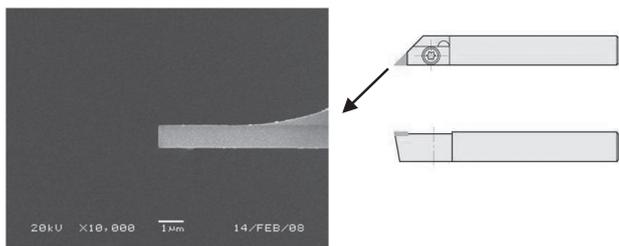


写真13 刃幅0.9μmのナノグループ

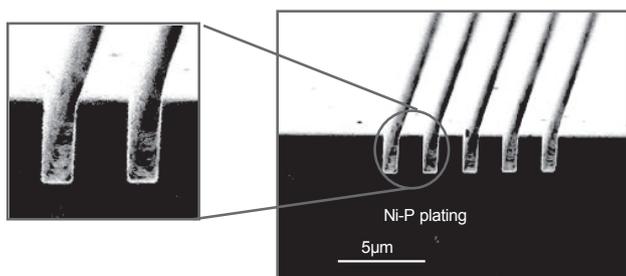


写真14 刃幅0.9μmのナノグループの加工例

れ用切削工具である。写真14は0.9μmのナノグループを用いて、無電解ニッケルめっきの表面に深さ3μmの溝を加工した事例である。バイトによる切削加工により半導体プロセスのフォトリソグラフィ法では得られない真直度とコーナに丸みのない加工が可能となっている。

6. UPC®の今後

超精密ダイヤモンド切削工具UPC®は市場ニーズに応えるべく単結晶ダイヤモンドの特徴を活かした超精密切削加工用工具として進化してきた。更に最近では市場ニーズとして従来のUPC®では加工困難な超合金の鏡面切削加工や微細形状の大面積への加工がある。これらに応えるため住友電工で開発

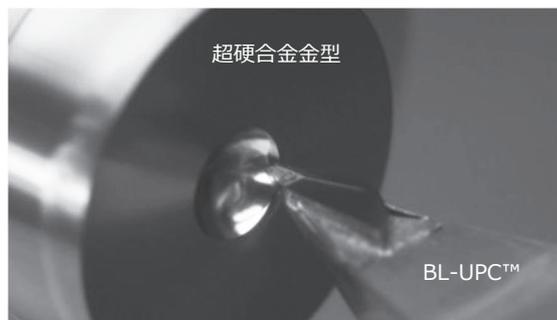


写真15 BL-UPCによる超合金金型加工

されたナノ多結晶ダイヤモンド スミダイヤ®バインドレスを用いたBL-UPC™の商品化に取り組んでいる。写真15は研削加工が難しい小径のガラスレンズ超合金金型の加工事例である。BL-UPC™は多結晶ダイヤモンド切削工具であるが、単結晶ダイヤモンド切削工具であるUPC®で無電解ニッケルメッキ金型を加工した場合と同様の表面粗さRa3.5nmが得られている。

7. 結 言

超精密ダイヤモンド切削工具UPC®はオプトメカトロニクス製品の様々な部品加工に用いられている。今回は代表的なUPC®でその主な特徴と開発の経緯について紹介した。最先端の製品開発を行うお客様からの要望に対応するため、前例がないものへの挑戦の連続であったが、常に原理原則に基づき、また、偶然得られた結果も原理原則に則し理解していくことで、超精密ダイヤモンド切削工具UPC®の開発、商品化が進んだ。今後もナノ多結晶ダイヤモンドや加工技術など周辺技術の進化に対応して、世界最先端の超精密ダイヤモンド切削工具の供給メーカーとしてあり続けたい。

用語集

※1 結晶方位

結晶中で原子が規則正しく並び面と方向を表わし、単結晶ダイヤモンドは面や方向により硬さなど違う異方性を持っている。

・スミクリスタルは住友電気工業(株)の登録商標です。

参考文献

- (1) 小島一志、「マイクロ切削工具の最新技術と応用」、砥粒加工学会誌、49巻10号、pp.538 (2005)
- (2) 小林篤史、小島一志、「超精密三次元マイクロ加工用ダイヤモンド切削工具の開発」、SEIテクニカルレビュー第171号、pp. 63-67 (July 2007)
- (3) 小島一志、「金型の磨きレス、ミニマム化を実現する超精密ダイヤモンド切削工具 [UPC/BL-UPC]」、機械技術、63 (9)、日刊工業出版プロダクション、pp. 54-56 (2015)
- (4) CO2レーザー用光学部品カタログ、住友電気工業(株)、pp.7、14 (April 2014)

執 筆 者

小島 一志 : (株)アライドマテリアル
ダイヤ営業統括部 主幹

